

Katedra metalurgie a slévárenství

Bakalářská práce

Analýza modifikace litiny plněnými profily

Analysis of cast iron modification by filled profiles

Jméno autora: Oldřich Dostražil

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Hampl, Ph.D.

Rok odevzdání: 2021

Poděkování:

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Jiřímu Hamplovi, Ph.D. za vedení mé bakalářské práce, za odborné připomínky a rady. Dále bych chtěl poděkovat kolegům ze Slévárny a modelárny Nové Ransko s.r.o., kteří mi byli nápomocni při realizaci experimentu této práce. Závěrem bych chtěl poděkovat své rodině a blízkým, kteří byli tolerantní, během psaní práce a studia mi byli oporou.

Abstrakt

Práce je zaměřena na výrobu litiny s kuličkovým grafitem modifikací plněným profilem (PP). Modifikace litiny plněným profilem byla ověřována v provozních podmínkách slévárny litiny. Při poloprovozních tavných testech byly testovány dva typy plněných profilů – $\varnothing 9$ mm s předslutinou FeSiMg25 a $\varnothing 13$ mm plněným FeSi s přídavkem 30% technicky čistého Mg. Modifikací bylo zpracováno vždy 600 kg tekutého kovu v modifikační pánvi. Účinnost modifikace se vyhodnocovala na zvlášť odlitých zkušebních tělesech. Jakosti modifikované LKG se vyhodnocovala pomocí dosažené mikrostruktury, mechanických vlastností a výpočtu účinnosti modifikace dokumentované využitím hořčíku včetně porovnání nákladů na modifikaci dvou typů plněných profilů $\varnothing 9$ a $\varnothing 13$ mm.

Klíčová slova:

plněný profil, modifikace, litina s kuličkovým grafitem

Abstract

The bachelor thesis is focused on the production of cast iron with spheroidal graphite (LKG) modification with filled profile (PP). The modification of the cast iron with the filled profile was verified in the operating conditions of the cast iron foundry. During pilot smelting, two types of filled profiles were tested - Ø 9 mm with FeSiMg25 pre-alloy and Ø 13 mm filled with FeSi with the addition of 30% technically pure Mg. The modification always processed 600 kg of liquid metal in a modification ladle. The effectiveness of the modification was evaluated on separately cast test specimens. The quality of the modified LKG was evaluated using the achieved microstructure, mechanical properties and calculation of the efficiency of the modification documented by the use of magnesium, including a comparison of the costs of modification of two types of filled profiles Ø 9 and Ø 13 mm.

Key word: filled profile, modification, cast iron with spheroidal graphite

Obsah

1. Cíl a stanovení postupu práce.....	5
2. Literární rozbor metod modifikace litiny s kuličkovým grafitem	6
2.1 Rozdělení litin	6
2.2 Vliv prvků na krystalizaci litin.....	6
2.3 Litiny s kuličkovým grafitem.....	8
2.4 Očkování	9
2.5 Modifikace	12
2.5.1. Modifikace uvnitř formy (In-mold).....	13
2.5.2. Metoda Sandwich.....	15
2.5.3. Metoda Tundish.....	16
2.5.4. Modifikace plněným profilem.....	17
3. Provozní ověření modifikace litiny s kuličkovým grafitem	19
3.1. Plněný profil Ø 9 mm.....	19
3.2 Plněný profil Ø 13 mm.....	22
4. Vyhodnocení struktury LKG.....	24
5. Vyhodnocení modifikace	33
5.1 Výpočet využití hořčíku:	33
6. Závěr	37
7. Literatura	38
8. Seznam tabulek	39
9. Seznam obrázků	40

1. Cíl a stanovení postupu práce

Cílem této práce je porovnat technologii modifikace plněným profilem o \varnothing 9 mm a \varnothing 13 mm, s konkrétním zaměřením na účinnost modifikace a stanovení využití hořčíku při modifikaci. V práci je popsáno strukturní a chemické vyhodnocení vzorků pro porovnání modifikace, která byla provedena ve Slévárně a modelárně Nové Ransko s.r.o. (dále společnosti). Obsahuje popis a výsledky konkrétních experimentů na ověření modifikace a finanční zhodnocení za účelem snížení nákladů na přípravu tekutého kovu k odlévání. V teoretické části této práce jsou shrnuty poznatky o metalurgických procesech používaných při modifikaci litin. Dále je práce zaměřena na rafinační pochody probíhající během tavení a metalurgické úpravy taveniny, především na zjemnění zrn očkovaním a změny morfologie grafitu litiny s kuličkovým grafitem.

Postupy řešení vycházejí z aktuálních možností tavírny společnosti, která je vybavena středofrekvenční indukční pecí se dvěma kelímky o obsahu 4 t taveniny. V bezprostřední blízkosti je pracoviště vybavené elektronicky řízeným podavačem plněného profilu o \varnothing 9 nebo 13 mm. Zpracovací štíhlá hrncová pánev o obsahu taveniny do 700 kg je během modifikace zavěšena, s mírným přtlakem víka, na jeřábu tak, aby byl únik reakčních produktů co nejnižší. Během celého procesu jsou zaznamenávány údaje o tavně včetně výsledků z termické analýzy a chemického složení spektrálním analyzátozem SPEKTRO AMETEK po natavení a po provedení úplné rafinace.

2. Literární rozbor metod modifikace litiny s kuličkovým grafitem

2.1 Rozdělení litin

Základem pro rozdělení druhu litin je tvar vyloučeného grafitu. Názvy jednotlivých druhů litin, značky a číselné označování vychází z evropské normy ČSN EN 1560:

Litina s lupínkovým grafitem – (LLG) – grafit je ve tvaru prostorových útvarů, které mají na metalografickém výbrusu tvar lupínků. Litina s lupínkovým grafitem je v provozní praxi nejčastěji využívána. [5]

Litina s kuličkovým grafitem – (LKG) – grafit je ve tvaru kuliček. Kuličkový grafit je z hlediska mechanických vlastností vhodný, protože významně zvyšuje tažnost, u konstrukčních dílů se z tohoto důvodu daří nahradit ocel litinou s kuličkovým grafitem. [5]

Litina s červíkovitým grafitem – (LVG) tvar grafitu je podobný s lupínkovým, ale ve srovnání s LLG jsou však útvary grafitu kratší a oblé. [5]

Temperovaná litina – (TL) tvar grafitu je ve tvaru vloček. Vločky grafitu které vznikají rozpadem ledeburitického cementitu. [5]

2.2 Vliv prvků na krystalizaci litin

Na krystalizaci litin má chemické složení velký vliv. Odlitky za stejných podmínek mohou mít různou strukturu, změnou složení litiny. Rozlišujeme vliv **prvků na krystalizaci** – jejich vliv na grafitizaci. Srovnáním prvků dostaneme řadu, kde vlevo najdeme prvky podporující grafitizaci, uprostřed jsou prvky neutrální a vpravo prvky bránící grafitizaci. [4]

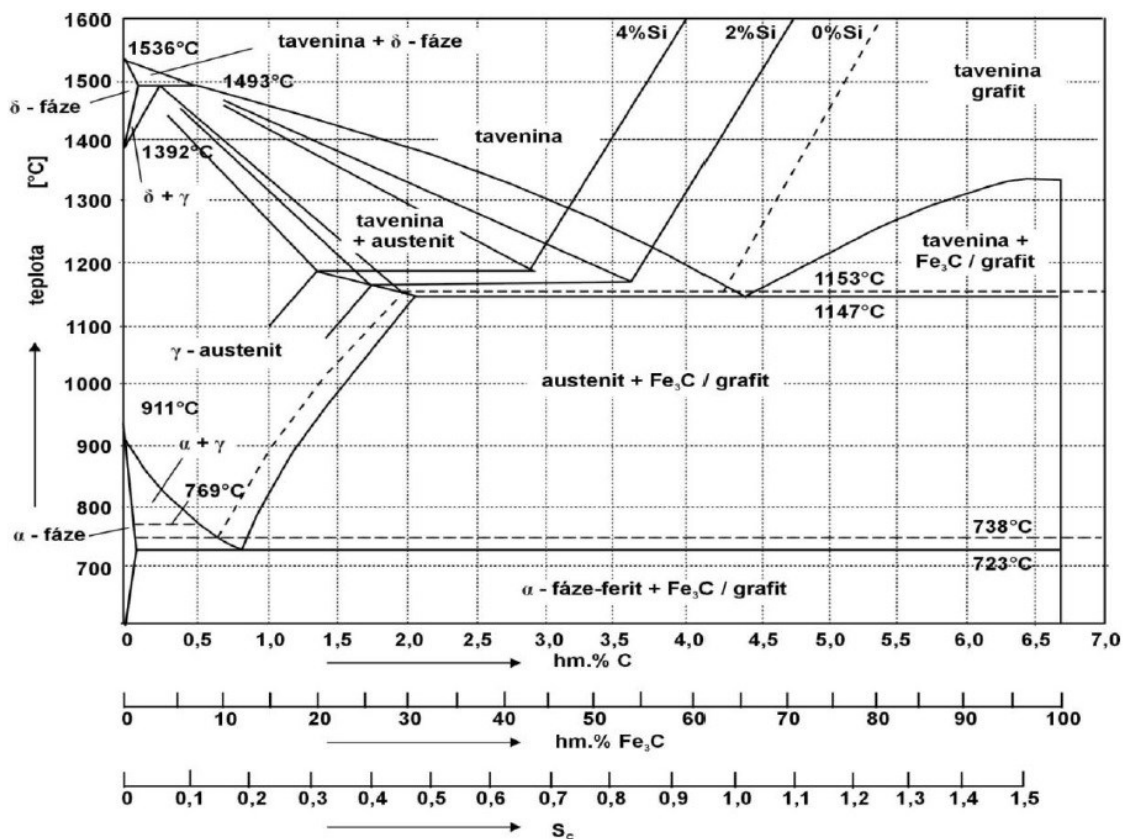
Al, C, Si, Ti, Ni, Cu, P, Co, Zr, Nb, W, Mn, Mo, S, Cr, V, Te, Mg, Ce, B

podporující grafitizaci

neutrální

bránící grafitizaci

Nejvýznamnější je vliv **uhlíku a křemíku**. Změněním jejich obsahu dostaneme různé stupně grafitizace a jiné požadované struktury v litině. Změní-li se zvýšením obsah jednoho z prvků, musí se snížit obsah druhého prvku, aby dosahovali stejného stupně grafitizace. Křemík má vliv na eutektickou teplotu a podporuje grafitizaci. Na diagramu na (Obr.1) je vidět, že zvyšování křemíku posouvá eutektický bod doleva a zároveň klesá koncentrace uhlíku. [4]



Obr. 1 Rovnovážný diagram Fe-Fe₃C [8]

2.3 Litiny s kuličkovým grafitem

Tvar kuliček získá grafit důsledkem krystalizace vyvolaným aktivními prvky přivedenými do taveniny při modifikaci. Nejčastěji používaným prvkem je Mg. Podmínkou změny tvaru grafitu je obsah zbytkového Mg v tavenině = 0,03-0,06% v LKG. Hořčík je používán v prášku, v podobě tyčí a v předslitinách plněných profilů. Dále mohou obsahovat např. stopy prvků Ce, které působí sferoidačně nebo prvky Ca zpomalující reakci. Tyto prvky v tavenině navozují tendenci tuhnout metastabilně a proto současně nebo napřed musí proběhnout očkování taveniny nejčastěji ferosiliciem. Cílem je vytvoření velkých zárodků grafitu a podpoření jejich růstu. Základními prvky jsou uhlík a křemík. Obsah síry v tavenině musí být co nejnižší mezi 0,01-0,02%. [6] [12]

Litiny s kuličkovým grafitem se dělí podle minimální pevnosti v tahu a dalších mechanických vlastností jako je tvrdost a tažnost.

Tab. 1 Přehled litin s kuličkovým grafitem [6]

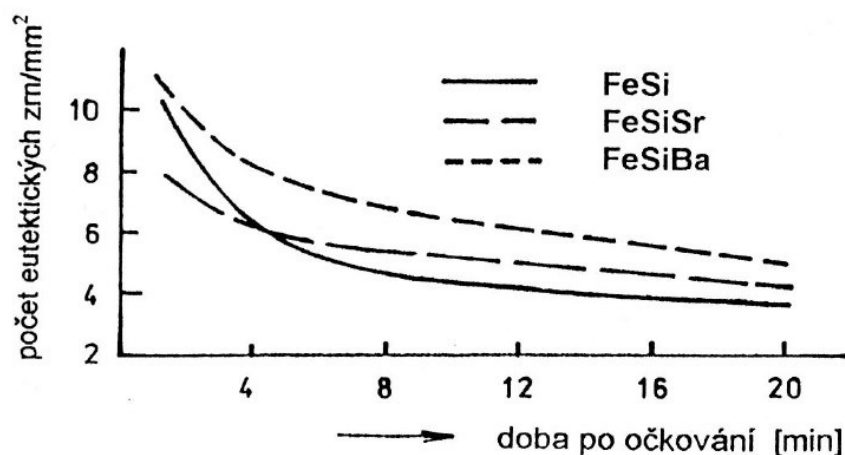
Norma	Struktura	R_m (MPa)	R_{p0,2} (MPa)	A₅ (%)	Tvrdost (HB)	Hustota (kg.m⁻³)	E (GPa)
42 2303	ferit	370	230	17	140-180	7010	169
42 2304	ferit	400	250	12	150-200	7040	169
42 2305	ferit + perlit	500	320	7	170-240	7050	169
42 2306	perlit + (ferit)	600	370	3	190-270	7060	169
42 2307	perlit	700	420	2	230-300	7070	169
42 2308	perlit + bainit	800	480	2	250-350	7080	169

2.4 Očkování

Hlavním účelem očkování je zjemnění zrn vnášením zárodků do roztaveného kovu, které s prvky Mn, Si, Ca a Al v kovu vytvářejí zárodky pro krystalizaci grafitu. (oxidy, siřníky a karbidy) To vede ke zjemnění mikrostruktury a rovnoměrnému vyloučení grafitu v celém odlitku. Tento proces je doprovázen i zlepšením mechanických vlastností a lepší obrobitelnosti na rozdíl od litiny s hrubozrnnou strukturou a nepravidelně rozmístěnými částicemi. [5]

Očkovadla musejí mít dobrou rozpustnost v litině a být krystalizačně aktivní. Dále musejí zajišťovat rovnoměrné rozpouštění se v tavenině a zvyšovat aktivitu uhlíku. To jsou základní požadavky kladené na nosnou látku a krystalizačně aktivní složky. [2]

Mezi nejčastěji používaná očkovadla patří očkovadla na bázi FeSi. Očkovadlo obsahuje nosič a krystalizační složku, protože jako čistá slitina FeSi nemá očkovací účinek. Mezi aktivní prvky očkovadla se řadí Ca, Al, Sr, Ba, Zr. Nejvíce plní tuto úlohu Ca a Al, kdy vytvářejí s oxidy CaO, SiO₂ a vytvářejí nukleační zárodky grafitu. Obdobným způsobem reaguje i stroncium (Sr) a barium (Ba), které mají i za následek zpomalení reakcí a tím prodloužení očkovacího účinku. Obr.[2]



Obr. 2 Odezdnívání očkovadla [5]

Vedle oxidů se vytvářejí také karbidy, nitridy a sirníky, které účinně podporují heterogenní nukleaci (vytváření zárodků). Aby se uhlík vylučoval ve formě grafitu, jeho aktivita musí být více než 1, tedy $A(C) > 1$. Na aktivitu mají také vliv i další prvky (Si, Al), kdy je nutné vzít v úvahu jejich vliv na aktivitu. [3]

Technologie očkování

Granulovým očkovadlem, kompaktními tělísky, pleněným profilem.

Očkovat můžeme **granulovaným očkovadlem**, tento způsob je nejčastější a nejvíce používaný. Jedná se o granulát o rozměrech od 0,2 – 10 mm v závislosti na hmotnosti očkovaného kovu. Způsoby, jak zavádět granulát je několik, ale ne všechny jsou optimální a nemají velkou účinnost. [3]

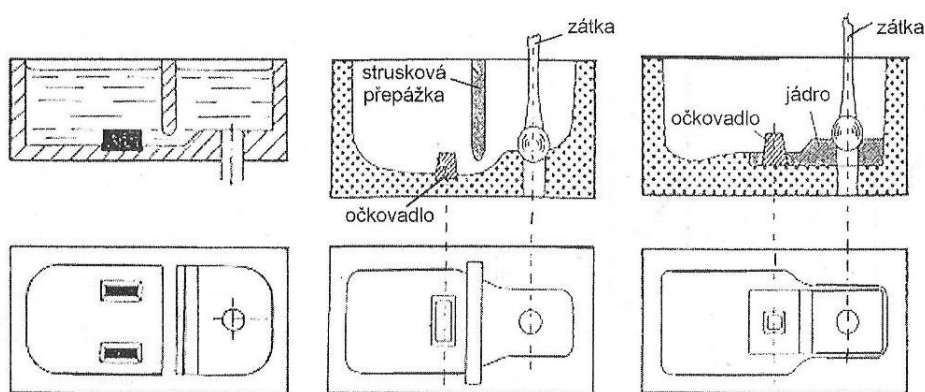
První možností je sypání očkovadla na žlábek od pece. Při naklonění pece při vylévání je očkovadlo společně s taveninou vnášeno do lící pánve, kde je taveninou ihned rozpouštěno. [3]

Druhým způsobem je nasypání očkovadla do lící pánve, ale k tomuto způsobu je nutné mít na dně pánve malé množství taveniny, aby nedocházelo k jeho připečení na dno pánve, než je do pánve nalit tekutý kov. Připečením části očkovadla nedochází k řádnému využití a očkování je pouze částečné. [3]

Ideálním způsobem je očkování při odlévání tekutého kovu do formy, který je další třetí možností. Zde využíváme nejčastěji strojního odlévání, kdy je využíváno zařízení pro odlévání a pomocí dávkovače, je očkovadlo dávkováno do proudu tekutého kovu při odlévání do formy. [3]

Očkování ve formě – In-mold – reakční komora s předslitinou hořčíku je umístěna ve vtokové soustavě přímo ve formě, kde dochází k očkování, tato metoda je častěji využívána k modifikaci.

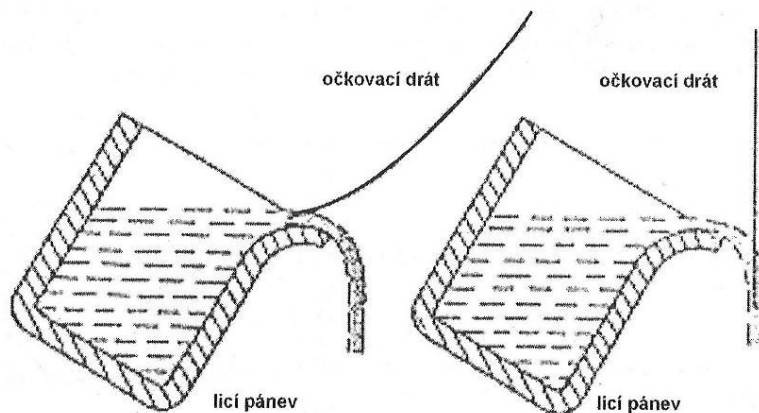
Vedle granulovaného očkovadla využíváme i očkování kompaktními tělísky. Způsob kompaktními tělísky je prováděn přidáváním tělísek na dno lící jamky. Odlévání tekutého kovu způsobuje jeho postupné odtávání a tím průběžné očkování tekutého kovu. Výhodou tohoto způsobu je odpadnutí časové prodlevy od naočkování po odlití kovu. Tato metoda má i své nevýhody, kdy je třeba využít filtrů nebo cedítek pro odfiltrování vměstků vzniklých při odlévání a postupnému odtavování očkovadla. [3]



Obr. 3 Očkování očkovacími tělísky [3]

Očkování **plněným profilem** – očkovač je zalisován v ocelové trubce, která je pomocí podávacího zařízení vpravována do pánve s tekutým kovem. Důležité je, aby se profil roztavil těsně u dna pánve a nedocházelo k jeho porušení nárazem profilu. U velkého objemu kovu je možné použití inertního plynu, který napomáhá k rozptýlení očkovače v tavenině. [3]

- Očkování plněným profilem můžeme rozdělit na očkování **do proudu kovu** a očkování **do pánve**.



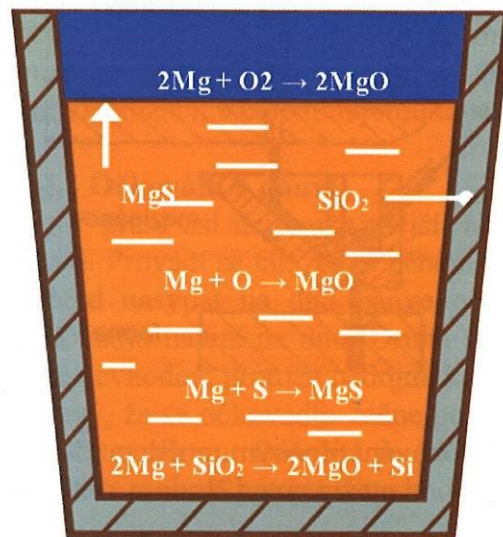
Obr. 4 Očkování do proudu a do pánve [3]

2.5 Modifikace

Modifikace je mimopecní zpracování litiny, která má za následek změnu tvaru grafitu z LLG lupínkového na kuličkový LKG. To doprovází i změna mechanických vlastností zejména tažnosti. Modifikační účinek litiny může způsobit celá řada prvků, ale v praxi se používá především hořčík. Jedná se o lehký kov, který má hustotu 4x menší než roztavená litina a tak vyplouvá na hladinu. Jedná se o silně karbidotvorný prvek. Díky nízké teplotě tavení Mg okolo 650°C, doprovází Mg bouřlivá reakce, při jeho vypařování. Hořčík má vysokou afinitu k síře a ke kyslíku, proto je modifikace doprovázena desoxidací a odsířením taveniny. Po modifikaci taveniny zůstává rozpuštěný zbytkový hořčík v tavenině od 0,03 do 0,06%. [2]

Princip modifikace

Ideální princip modifikace je takový, že se začne u dna pánve Mg vypařovat a tím stoupá taveninou k hladině. Během tohoto procesu část hořčíku reaguje s prvky obsaženými v litině a to zejména s kyslíkem za vzniku MgO a sírou za vzniku MgS. Společně vyplouvají na hladinu a vytvářejí sekundární strusku. Vizually můžeme pozorovat nad taveninou záblesky doprovázející modifikaci, které jsou tvořeny částí par Mg reagujícími se vzdušným kyslíkem. Hořčík reaguje také s výdusku převážně tvořenou SiO_2 za vzniku MgSiO_3 , který tvoří také sekundární strusku. Pro modifikaci, vznik kuličkového grafitu je podstatný pouze zbytkový hořčík obsahující již zmíněný obsah Mg 0,03 až 0,06%. Na vznik kuličkového grafitu má také vliv teplota taveniny, způsob modifikace a lidský faktor (kázeň pracovníků). [2]



Obr. 5 Základní reakce při modifikaci Mg [2]

Ostatní reakce znamenají ztrátu hořčíku a nechají se spočítat, jako využití hořčíku. Obsah Mg je nutno řídit tak, aby se neprojevil zmíněný nepříznivý vliv hořčíku. To znamená množství hořčíku do taveniny přivedené a podíl zbytkového hořčíku. [2]

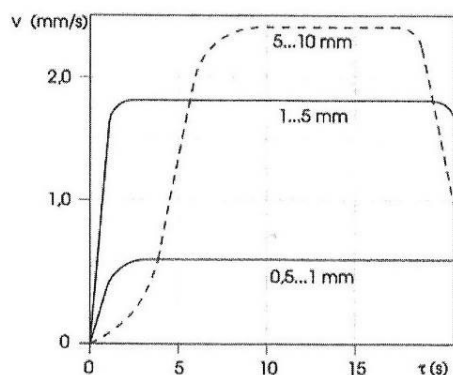
$$\eta_{\text{MOD}} = \frac{0,76 * \% \text{Sv} + \text{Mg}_{\text{ZBYT}}}{\% \text{Q}_{\text{MOD}}} * 100 \quad (1)$$

- Z řady modifikací, jsem zvolil nejběžnější čtyři způsoby modifikace tekutého kovu.

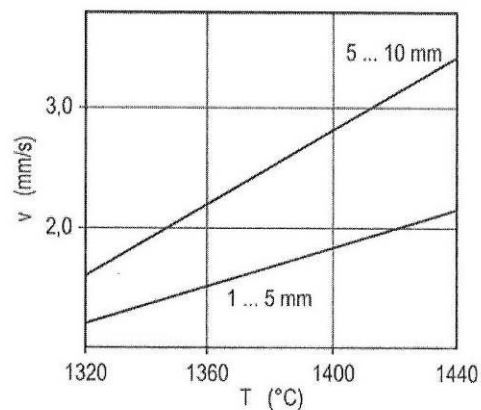
2.5.1. Modifikace uvnitř formy (In-mold)

Tato metoda je velmi rozšířená, z důvodu nejnižších finančních nároků a operativnosti. Tento proces neprobíhá v pánvi, ale přímo uvnitř odlitku. Jedná se o modifikační granulát nebo tabletu, která se vkládá do speciální komory přímo ve vtokové soustavě. Během plnění formy tekutým kovem probíhá modifikace. Vtoková soustava je rozvedena standardně, aby došlo ke

správnému naplnění dutiny formy modifikovaným tekutým kovem. U této metody je nutné správně sladit rychlost proudící taveniny s rychlostí rozpouštění modifikačního přípravku (obr.1). Tato metoda se vyznačuje vysokým využitím modifikátoru, který je až 90%. [1]



Obr. 6 Závislost rychlosti rozpouštění pro různou granulometrii [1]



Obr. 7 Závislost rychlosti rozpouštění granulátu na teplotě tekutého kovu [1]

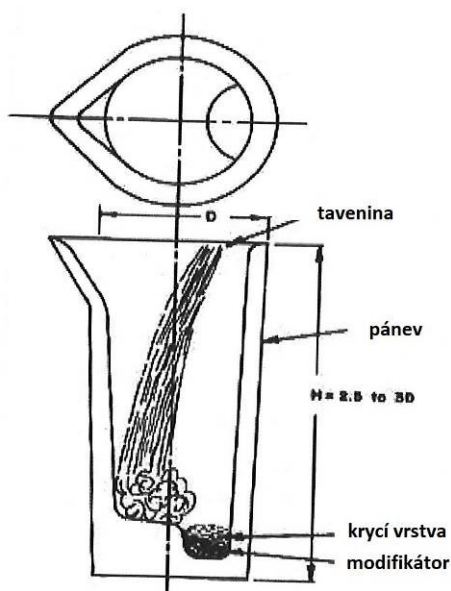
Rozpouštění v reakční komoře je odlišné od běžného způsobu rozpouštění modifikátoru, protože se vytvoří mezivrstva, kterou tavenina proudí a probíhá uvnitř v reakční komoře, téměř bez přístupu kyslíku. Rozpuštěním aktivních prvků Mg, Ce, Ca, Ba, Sr atd. dochází ke zvýšení povrchového napětí mezi taveninou a rostoucím grafitem na vytvořených krystalizačních zárodkách. Při nevhodně zvolené vtokové soustavě může docházet k rychlému růstu austenitu, který obklopuje zárodky grafitu. Tento podeutektický děj může mít, v důsledku ochlazení a vyloučení grafitu, za následek tvorbu zákalky. U metody In-mold je ale riziko vzniku zákalky podstatně nižší i u tenkých stěn odlitku. [1]

Navrhování vtokové soustavy pro metodu In-mold

Pro tuto metodu je důležité zajistit konstantní proudění tekutého kovu, aby mohl být průběžně modifikován. Tomuto kroku může pomoci zmenšení průřezu a tím snížením průtoku taveniny za reakční komorou. Pro metodu In-mold je vhodnější použít přetlakovou vtokovou soustavu, protože zamezuje přístupu vzduchu. [1]

2.5.2. Metoda Sandwich

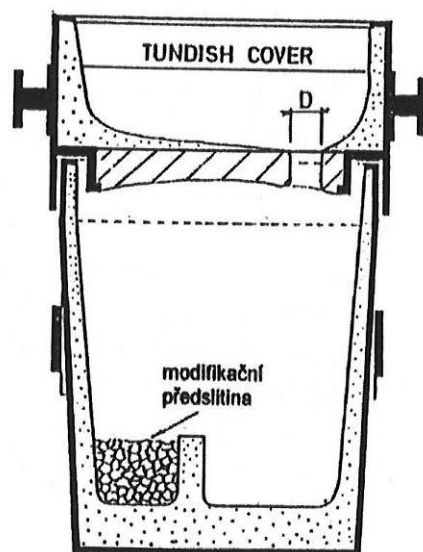
Mezi základní a nejjednodušší polévací metody patří metoda Sandwich. Polévací metoda proto, že se tavenina nalévá na modifikátor, který je umístěn na dně pánve. Při modifikaci je používána modifikační pánev s přepážkou na dně pro vsypání modifikátoru. Vsypaný modifikátor se poté zasype odštířky ocelového plechu, aby nedocházelo k jeho vyplavování proudem taveniny a tím se i zefektivnil a oddálil průběh modifikace. Protože tekutý kov musí nejdříve protavit plech a až teprve poté se dostane k modifikátoru. Díky tomuto procesu se pánev stihne zaplnit z části taveninou. Pokud by se tento krok vynechal, modifikátor by začal ihned reagovat při kontaktu s taveninou. Vyplouval by velmi rychle na hladinu a shořel by bez modifikačního účinku. Při této metodě se používá pánve, které je štíhlá a výška je přibližně dvakrát až třikrát větší, než její průměr. Vzhledem k tomu, že při této modifikaci dochází k hojnému rozstříku kovu, není tato metoda příliš vhodná. A to i vzhledem k nízké účinnosti modifikace, které se pohybuje okolo 40%. Tato metoda je vhodná především pro podniky, kde se modifikace provádí pouze ojediněle bez velkých investičních nákladů. [2]



Obr. 8 Metoda Sandwich [2]

2.5.3. Metoda Tundish

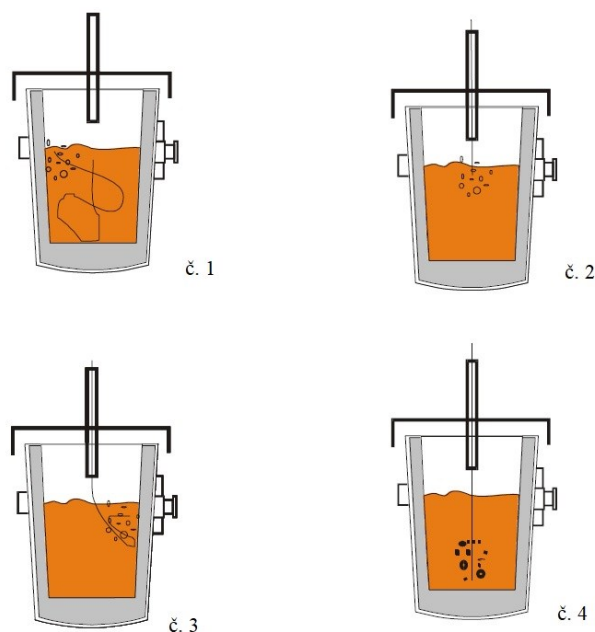
Metoda Tundish je vylepšení metody Sandwich. Na modifikační pánev dosedá krycí víko, s otvorem pro nalévání tekutého kovu. Modifikátor i s případným očkovadlem je opět umístěn ve dně pánve za přepážkou. Tato metoda má lepší účinek při modifikaci je okolo 50%, protože víko omezuje přístup vzduchu a tím snižuje ztráty oxidací hořčíku na hladině. Také zamezuje rozstříku kovu a nižší je i exhalace vznikající při modifikaci. [2]



Obr. 9 Metoda Tundish [2]

2.5.4. Modifikace plněným profilem

Jedná se o metodu, kde je jemně nadrcené očkovadlo zabaleno v tenké trubičce o které se hovoří jako o plněném profilu o síle stěny 0,4mm. Nejběžněji používaný je profil o \varnothing 9 mm a 13 mm. Tento plněný profil je dodáván v cívce, ze které je postupně odvíjen zaváděním do zařízení s podavačem, počítadlem a nastavitelnou rychlostí podávání plněného profilu vpravován do modifikační pánve. Plněný profil musí být podáván takovou rychlostí, aby docházelo k jeho odtavování ve spodní části modifikační pánve, ale nedocházelo tím porušení dna či vyzdívky pánve. Zavádění plněného profilu musí být zajištěn pozvolný průchod zařízením, aby nedocházelo k jeho lámání. Profil by měl vstupovat doprostřed pánve, to zajišťuje otvor ve středu víka, které je opatřeno žáruvzdornou vyzdívkou. Pro modifikaci jsou vhodné štíhlé pánve (poměrem výšky k průměru 2:1), to zajišťuje reakci Mg na delší vzdálenost v tavenině a má tak delší čas na reakce. [7] [8]



Obr. 10 Zavádění plněného profilu [7]

Na obr. 10 je č. 1 vysoká rychlost, č. 2 nízká rychlost, č. 3 je nesprávné zavádění profilu, č. 4 je ideální zavádění plněného profilu

Tato technologie modifikace plněného profilu je velmi rozšířená, velkou výhodou je malá tepelná ztráta při modifikaci, která se pohybuje mezi 30 až 50°C. Dále nejmenší množství zpracované touto metodou se pohybuje okolo 200 kg. Běžně se zpracovávané množství pohybuje od 500 kg až kolem 30 tun, ale maximální nelze přímo stanovit. Parametry rychlosti podávání plněného profilu závisí hlavně na výšce tekutého kovu v pánvi a na teplotě. Rychlost bývá běžně stanovena mezi 15 až 40 m/min (může být i vyšší). Výsledkem je doba zpracování tekutého kovu pohybující se od 0,5 až 2 minut na množství 500 kg až 2000 kg zpracovávaného kovu. [7]



Obr. 11 Zařízení pro podávání plněného profilu (autor)

Výhody:

- nízké teplotní ztráty během zpracování kovu
- dosažení nižších nákladů na zpracování kov
- flexibilní s ohledem na měnící se podmínky (obsah síry, teplotu, množství kovu)
- optimalizované složení plněného profilu pro slévárny (metalurgické podmínky)

nevýhody:

- vyšší pořizovací náklady na podávací zařízení

3. Provozní ověření modifikace litiny s kuličkovým grafitem

3.1. Plněný profil Ø 9 mm

K praktickému experimentu byla použita modifikační pánve pro hmotnosti taveniny 600 kg, která byla v dostatečném předstihu před modifikací přehřívána hořákem na zemní plyn. Alternativně může být použito prohřátí pánve taveninou, která je vrácena do pece, aby byla dohřáta na požadovanou teplotu. Jedná se o teplotu taveniny 1 530 °C.



Obr. 12 Přehřívání modifikační pánve (autor)

Důvodem zvýšení teploty je delší doba manipulace s taveninou. Přelitím taveniny z pece do modifikační pánve a jejím umístění pod víko podavače plněného profilu se dostaneme s teplotou okolo 1 475 °C. Následuje samotný proces modifikace podávání plněného profilu do taveniny v pánvi. Na obrázku je vidět umístění zavěšené pánve pod víkem a její mírné přitlačení na víko při modifikaci, aby nedocházelo k velkému propalu Mg, rozstříku a částečnému omezení oxidace taveniny. Současný použitý modifikátor je předslitina FeSiMg25 o Ø 9 mm. Na modifikaci 600 kg taveniny bylo použito 36 m plněného profilu.



Obr. 13 Modifikace litiny plněným profilem (autor)

Dále následuje manipulace, a to přelévání z modifikační pánve do předeřtáté lici bubnové pánve. Na počátku přelévání je do tekutého kovu vpraveno na dno pánve očkovadlo FeSi75 o hmotnosti 1,8 kg. Tato hmotnost může být i zvýšena v návaznosti na výsledky z chemické a termické analýzy. Po odlití byla modifikace chemicky vyhodnocena.

Po odlití a zchladnutí formy, do druhého dne, přišlo na řadu vytlučení odlitku na roštu. Další cesta odlitku vedla do brusírny k odstranění zbytků formovací směsi z povrchu odlitku, tryskáním ocelovými broky. Protože se jedná o litinu s kuličkovým grafitem, vtoková soustava se odstraňuje řezáním úhlovou bruskou. V průběhu odstraňování vtokové soustavy byl z každého

kusu odlitku, odlévaným z již popisované výroby, odebrán kontrolní vzorek pro kontrolu mikrostruktury.



Obr. 14 Nadělené vzorky

Vzorky byly ve stejné oblasti odděleny úhlovou bruskou a následovalo jejich nařezání na pásové pile, aby nedocházelo k tepelnému ovlivnění, při řezání úhlovou bruskou. Tento postup byl proveden 3krát a jednalo se o tři modifikace č.1, č.2, č.3 pro vyhodnocení struktury a chemického složení. (obr. 16 – 21)

3.2 Plněný profil Ø 13 mm

Druhá část experimentu byla provedena s modifikačním plněným profilem o \varnothing 13mm složení FeSi a 30% technicky čistý Mg. Na obr. 21 je zachycen obsah plněného profilu - granule hořčíku a ferosilicia po odstranění podílů pod 0,5mm.



Obr. 15 Obsah plněného profilu Ø 13 mm zvětšený 12x (po vyplavení podílu pod 0,5mm)

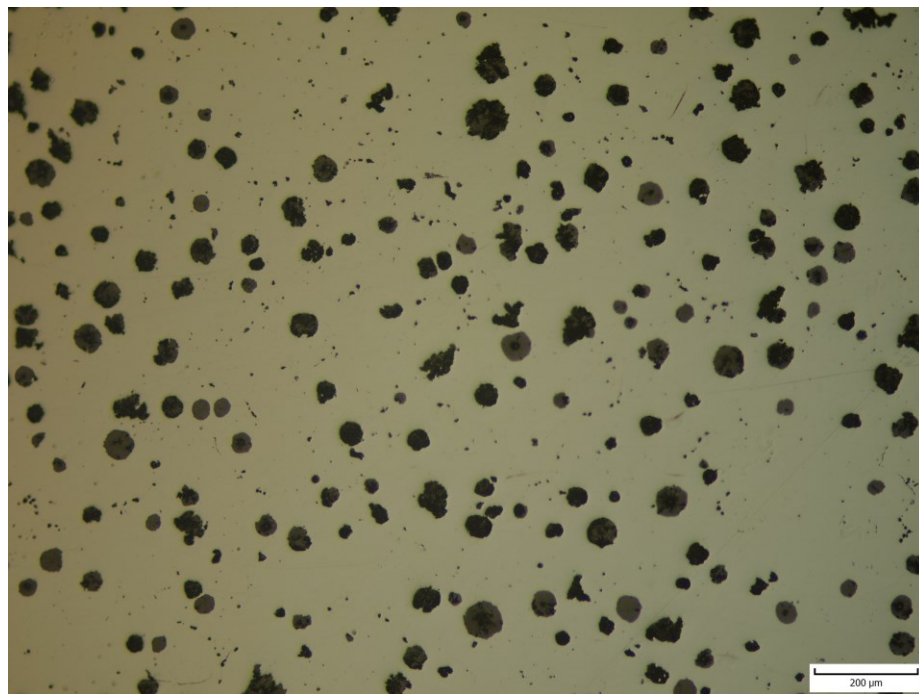
Rychlost podávání byla stanovena dle předchozího plněného profilu, jelikož se jednalo o plněný profil s pláštěm rovněž 0,4 mm. Upravil se pouze počet metrů. Z profilu \varnothing 9 mm bylo z materiálového složení stanoveno 110 g Mg v jednom metr profilu a na modifikaci bylo použito 36 m. V profilu \varnothing 13 mm bylo uvedeno množství 200 g čistého technického Mg v jenom metru. Odvozením bylo stanoveno množství 19,5 metrů plněného profilu.

Umístění plněného profilu do podavače nebylo náročné na úpravu, jelikož jsou posuvné kladky v podavači z důvodu universálnosti přitlačovány vestavěnou pružinou a proto nebylo zavedení plněného profilu \varnothing 13 mm komplikací.

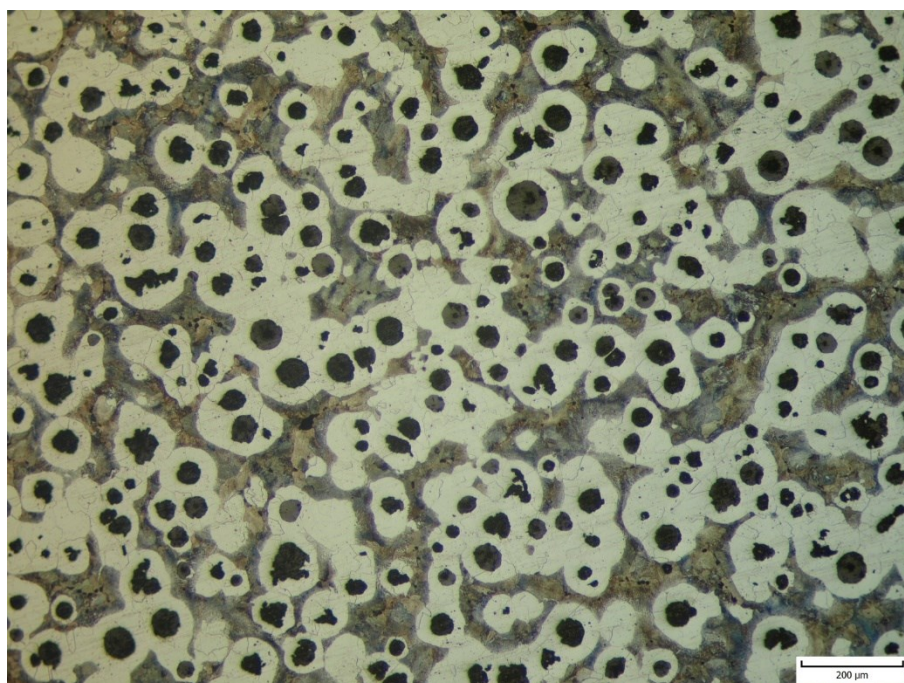
Experiment probíhal ve spolupráci s taviči, slévači a metalurgem. Pro chemické ověření správnosti bylo navrženo po modifikaci, očkování a stažení strusky, při teplotě 1 360 °C odebrat vzorek penízku, ze kterého byl proveden chemický rozbor. Modifikační účinek se nechal odeznít a kov byl zpět vrácen do pece, kde byl dohřátý na požadovanou teplotu.

Stejně jako u předchozí modifikace byla teplota taveniny vylévané z pece 1 530 °C. Jednalo se o 605 kg taveniny přelité do modifikační pánve. Následovalo její umístění pod viko podavače plněného profilu, kde byla naměřena teplota 1 483 °C. Průběh samotné modifikace byl doprovázen větší a bouřlivější reakcí Mg. To odpovídalo většímu počtu Mg v jednom metru plněného profilu a jeho intenzivnějšímu uvolnění za kratší dobu v tavenině. Modifikovaná tavenina byla jeřábem přepravena od podavače plněného profilu k její přelití do lící bubnové pánve, doočkování opět 1,8 kg Fesi75 a stažení strusky. Před odléváním do forem byla naměřena teplota 1 382 °C. Z takto postupně třech modifikovaných pánví byly odlity a vyčleněny rovněž tři kontrolní odlitky. Formovací rámy s odlitky byly označeny značkovacím sprejem. Vytlučené odlitky z forem byly postoupeny do brusírny k jejich otryskání a odstranění vtokové soustavy. Stejným způsobem, jako bylo popsáno, byl z vyčleněných třech kusů odlitků, proveden výřez pro strukturní srovnání s prvními vzorky, označené jako č.4, č.5 a č.6. (obr. 22 - 27)

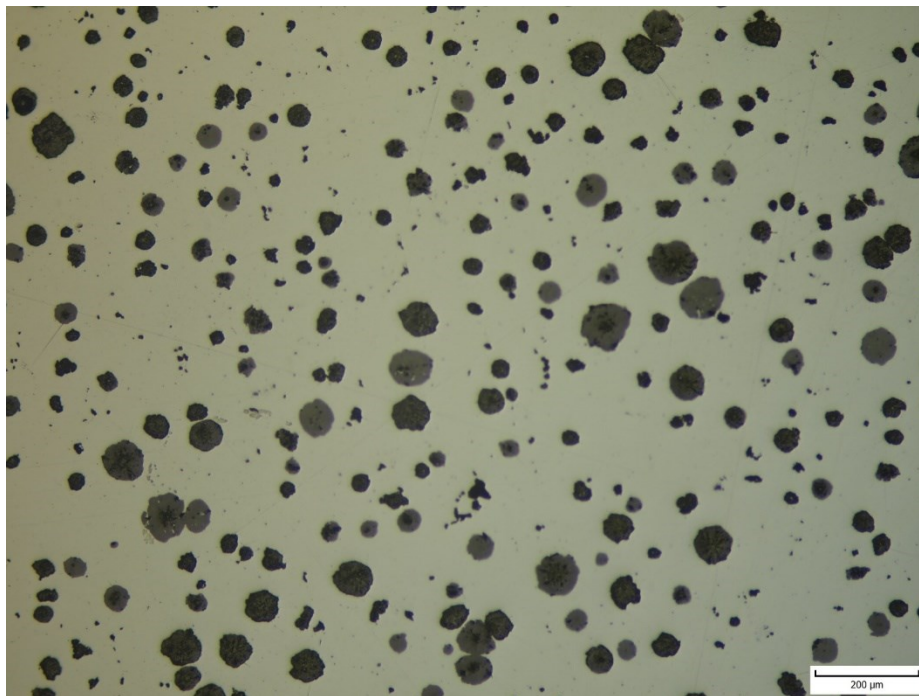
4. Vyhodnocení struktury LKG



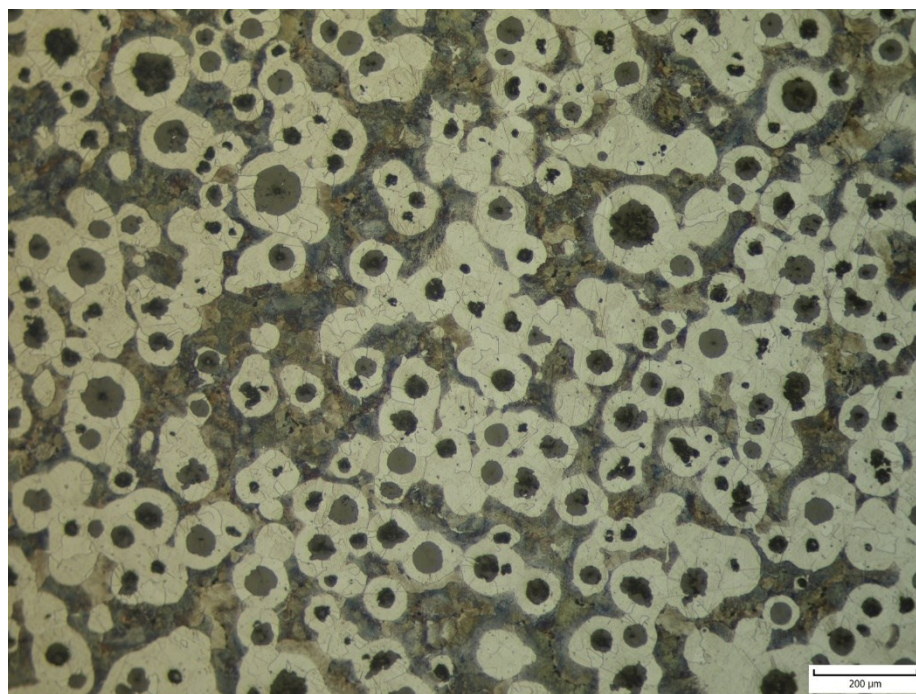
Obr. 16 Vzorek č.1 – 111 kuliček/mm², tvaru grafitu V- 26/mm²



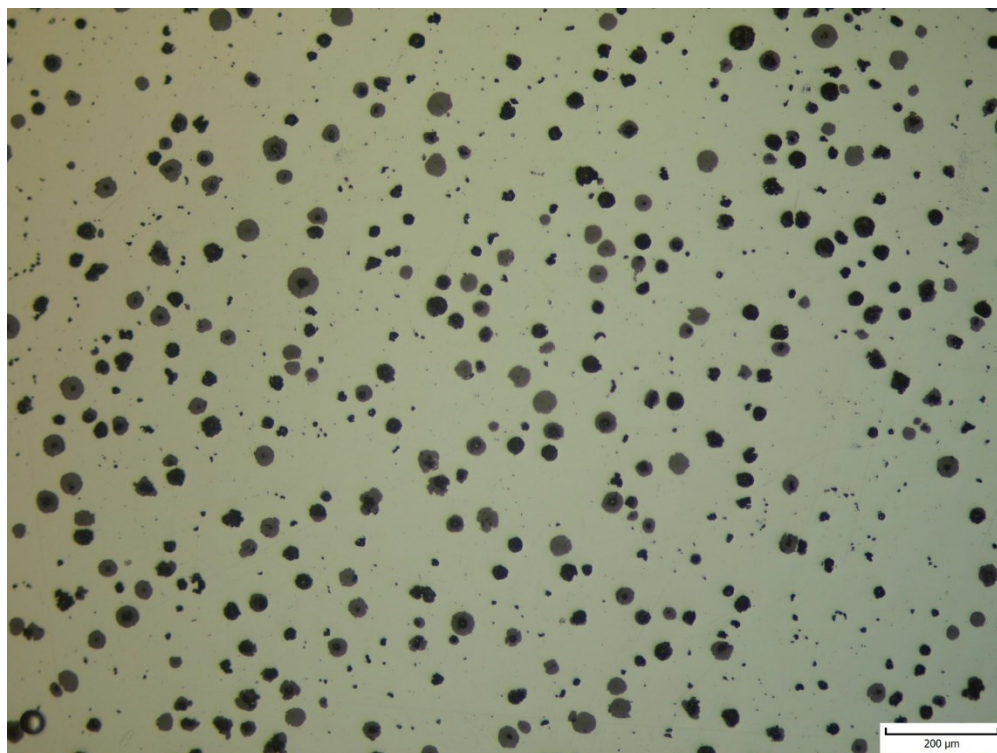
Obr. 17 Struktura vzorek č.1, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL



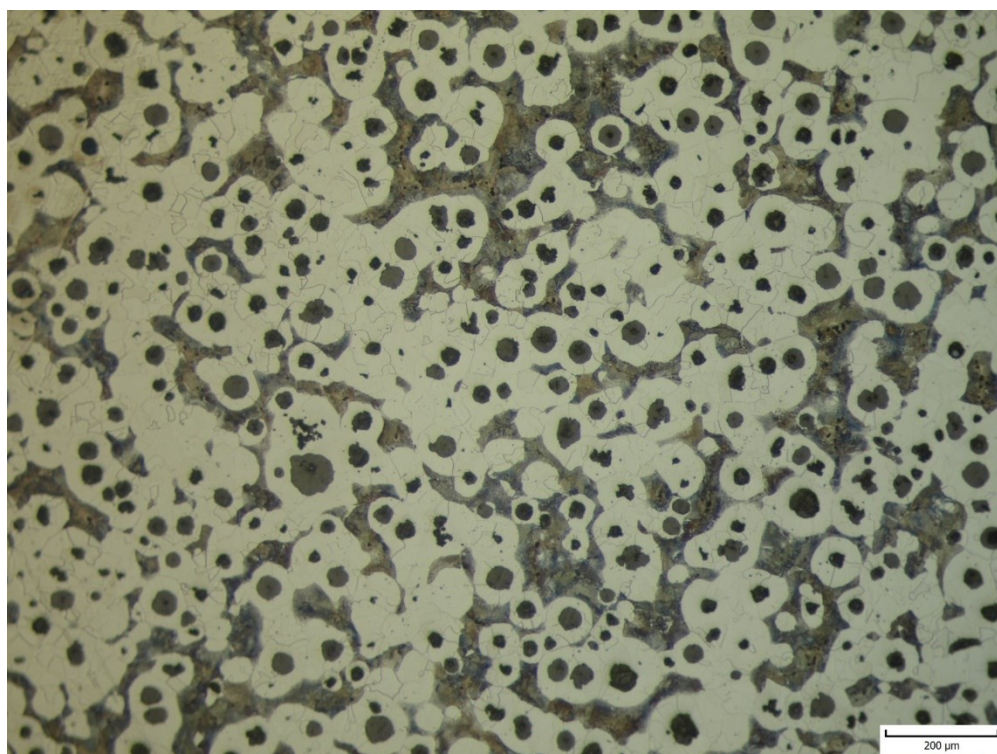
Obr. 18 vzorek č.2 – 107 kuliček/mm², tvaru V-28/mm²



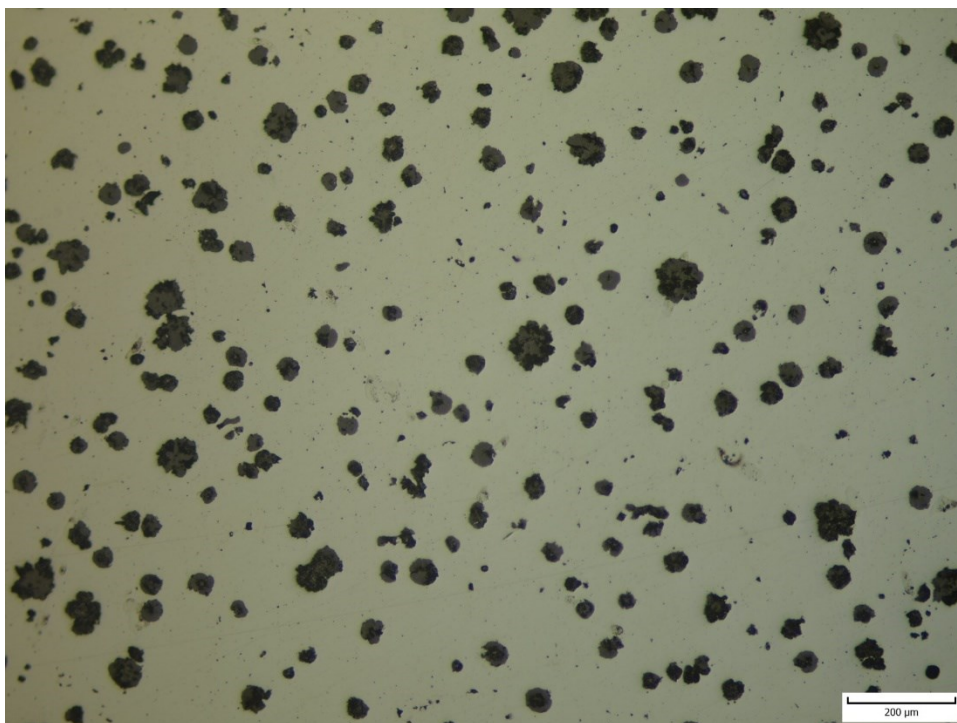
Obr. 19 Struktura vzorek č.2 zvětšeno 100x, leptadlo NITAL



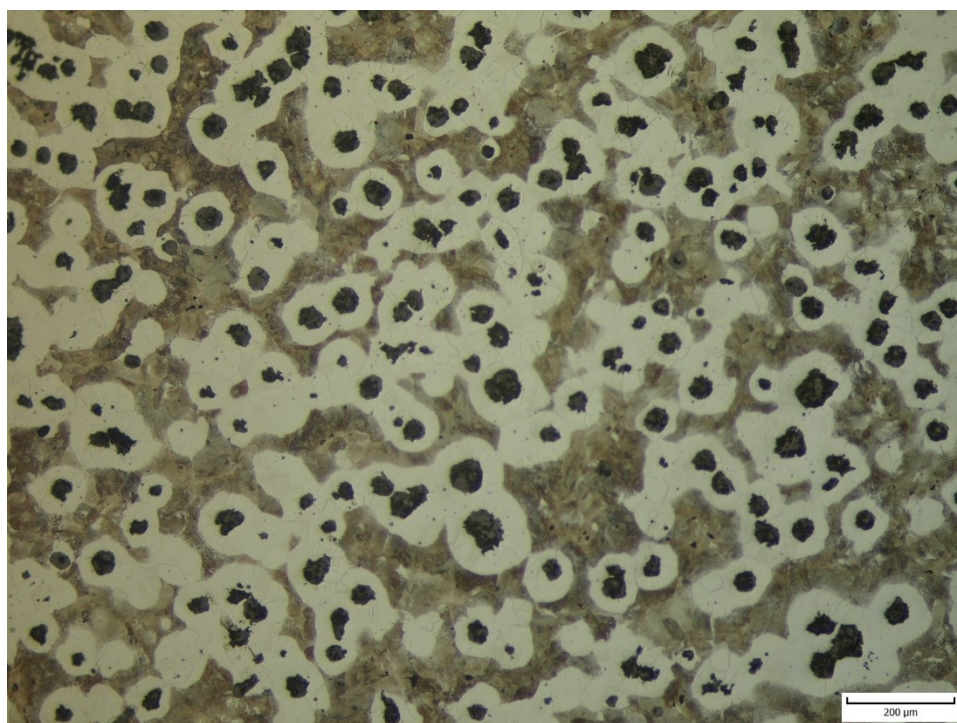
Obr. 20 Vzorek č.3 – 152 kuliček/mm², tvaru V – 24/mm²



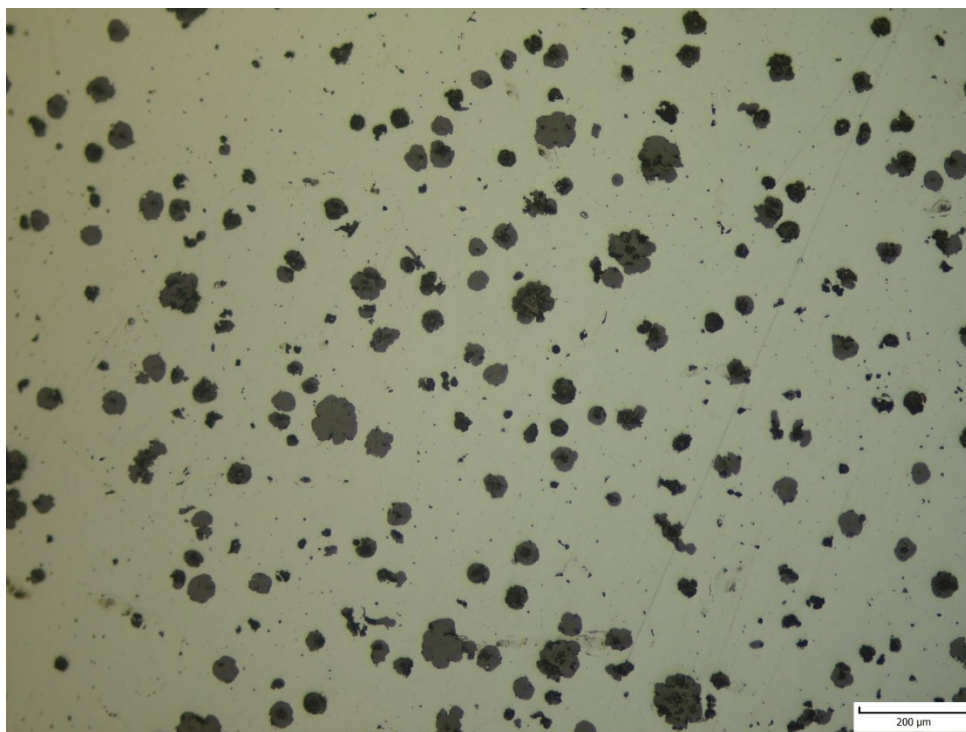
Obr. 21 struktura vzorek č.3 zvětšeno 100x, leptadlo NITAL,



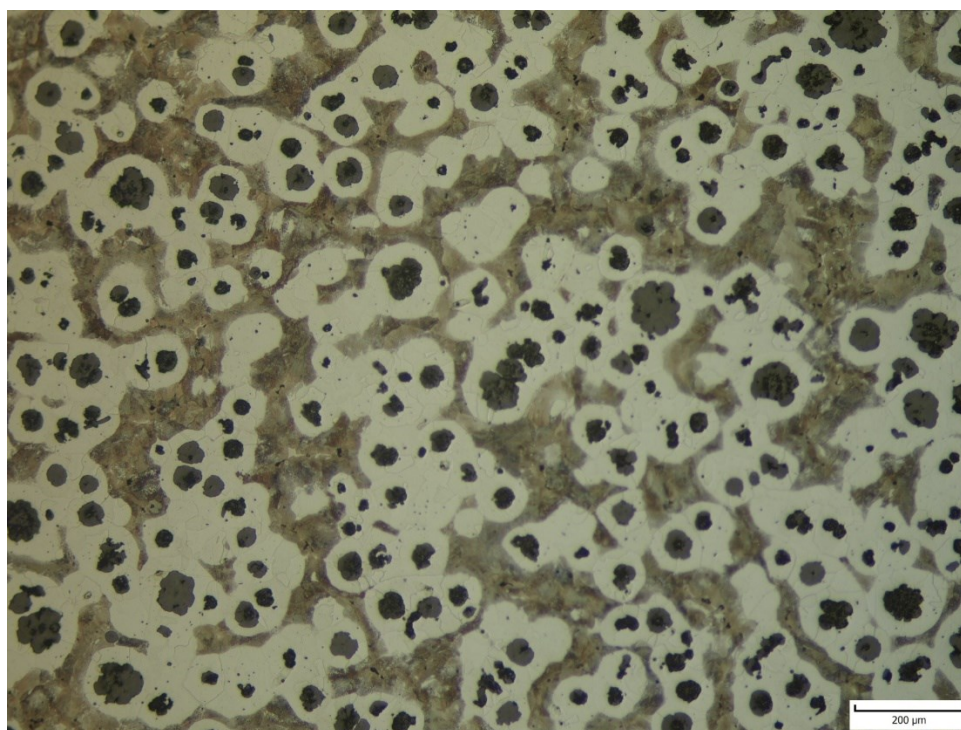
Obr. 22 Vzorek č. 4 – 89 kuliček/mm², tvaru V – 28mm²



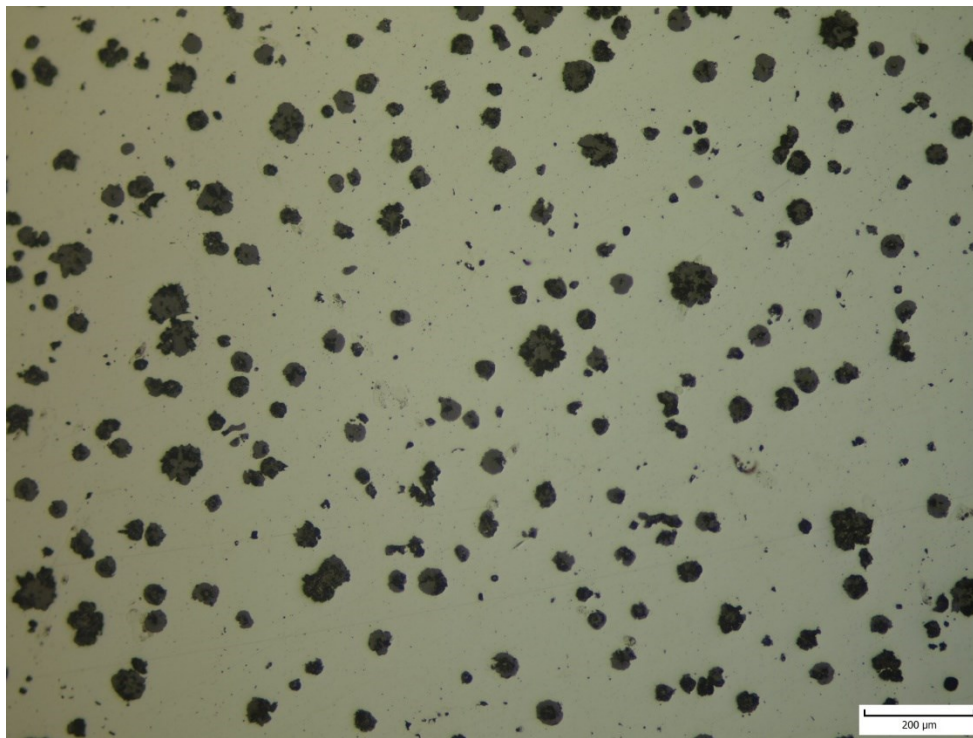
Obr. 23 struktura vzorek č. 4 zvětšeno 100x, leptadlo NITAL,



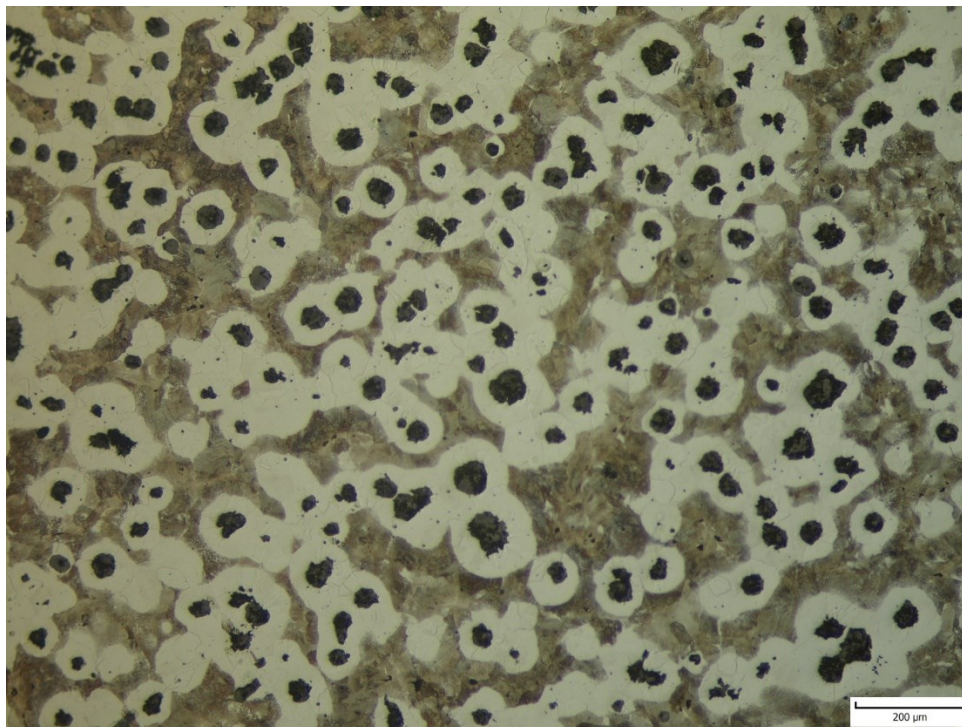
Obr. 24 Vzorek č. 5 – 84 kuliček/mm², tvaru V – 30/mm²



Obr. 25 struktura vzorek č. 5 zvětšeno 100x, leptadlo NITAL



Obr. 26 Vzorek č. 6 – 95 kuliček/mm², tvaru V – 25/mm²



Obr. 27 struktura vzorek č. 6 zvětšeno 100x, leptadlo NITAL,

Vyhodnocení struktur (dle normy ČSN EN ISO 945)

plněný profil \varnothing 9 mm

- struktura č. 1 obsahuje 111 kuliček na mm^2 a z toho je 26 kusů nedokonalého tvaru grafitu. (V- 26, VI -85), zvětšeno 100x
- struktura č. 2 obsahuje 107 kuliček na mm^2 a z toho je 28 kusů nedokonalého tvaru grafitu (V- 28, VI -79), zvětšeno 100x
- struktura č. 3 obsahuje 152 kuliček na mm^2 a z toho je 24 kusů nedokonalého tvaru grafitu (V- 24, VI -128), zvětšeno 100x

plněný profil \varnothing 13 mm

- struktura č. 4 obsahuje 89 kuliček na mm^2 a z toho je 28 kusů nedokonalého tvaru grafitu (V- 28, VI -61), zvětšeno 100x
- struktura č. 5 obsahuje 84 kuliček na mm^2 a z toho je 30 kusů nedokonalého tvaru grafitu (V- 30, VI -54), zvětšeno 100x
- struktura č. 6 obsahuje 95 kuliček na mm^2 a z toho je 25 kusů nedokonalého tvaru grafitu (V- 25, VI -70), zvětšeno 100x

Zvětšení všech struktur je 100x, pro leptání bylo použito leptadlo NITAL – 3% roztok HNO_3 (kyseliny dusičné)

Tažnost

Zkušební tělesa pro zkoušku tahem obrobené dle normy ČSN EN 1563 pro plněný profil \varnothing 9 mm se po přetrhnutí pohybují mezi 19 % až 21 % tažnosti. (tento výsledek potvrzuje i počet kuliček na mm^2)

Pro plněný profil \varnothing 13 mm se po přetrhnutí pohybujeme mezi 16 % až 17 % tažnosti. Jedna přetržená tyčka měla tažnost 11 %, ale na lomové ploše byla zjevná vada.

Tab. 2 Chemické analýzy (%) taveb 1 - 6

Pec 1											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,83	2,01	0,178	0,0641	0,0194	0,0233	0,002	0,0149	0,0024	0,001	0,0305	0,0011
Vzorek 1											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,8	2,55	0,194	0,0621	0,0124	0,0241	0,0024	0,0161	0,0159	0,001	0,0314	0,0491
Vzorek 2											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,68	2,58	0,201	0,0652	0,0134	0,0242	0,0025	0,0155	0,0153	0,001	0,0304	0,0572
Vzorek 3											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,66	2,58	0,205	0,0647	0,0147	0,0244	0,002	0,0158	0,016	0,001	0,0307	0,0503
Pec 2											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,82	2,03	0,188	0,0614	0,0169	0,0351	0,0041	0,0173	0,0028	0,001	0,0254	0,0011
Vzorek 4											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,72	2,53	0,203	0,0596	0,0132	0,0358	0,0042	0,0184	0,0165	0,001	0,0267	0,0367
Vzorek 5											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,65	2,55	0,207	0,06	0,0128	0,036	0,0037	0,0175	0,0167	0,001	0,026	0,0396
Vzorek 6											
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	Mg
3,6	2,59	0,208	0,0664	0,0172	0,0356	0,0047	0,0171	0,0159	0,001	0,0259	0,039

V tabulce 2 jsou chemické analýzy provedených taveb. Hodnoty byly naměřeny přístrojem SPECTRO AMETEK, jak ze vzorků z pecí, tak i z kontrolních vzorků. Tyto hodnoty jsou dále použity pro výpočty účinnosti modifikace a využití hořčíku.

Vyhodnocení modifikace

Součástí této práce je i vyhodnocení účinku modifikace a stanovení využití hořčíku. Vyhodnocení probíhalo výpočtem, kde je pro nás rozhodujícím faktorem využití hořčíku a podíl zbytkového hořčíku. (Výpočty budou provedeny závěrem této práce.) Tyto výpočty lze stanovit ze vzorců:

$$\eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 \quad (2)$$

η_{Mg} – využití hořčíku %

Mg_{ZBYT} – zbytkový obsah Mg (po modifikaci) %

Mg_{Vs} – celkové množství vsazeného Mg %

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 \quad (3)$$

η_{mod} - účinnost modifikace (%)

m - hmotnost modifikované litiny (kg)

ΔS – rozdíl obsahů S před a po modifikaci (%)

L_{pp} – délka použitého plněného profilu

Mg_{pp} – obsah Mg v náplni plněného profilu

G_{pp} – hmotnost náplně v 1 m plněného profilu

5. Vyhodnocení modifikace

Specifikace plněného profilu \varnothing 9 mm:

- hmotnost 240 g/m;
- hmotnost náplně 110 g/m;
- složení náplně: Si = 45 %, Mg = 25 % (27 g/m)
- tloušťka ocelového pláště obalu 0,4 mm, rychlost podávání PP = 0,3 m/s
- 2,23 euro/kg

Specifikace plněného profilu \varnothing 13 mm:

- hmotnost 395 g/m;
- hmotnost náplně 240 g/m;
- složení náplně: Si = 48 %, Mg = 30 % (72 g/m)
- tloušťka ocelového pláště obalu 0,4 mm, rychlost podávání PP = 0,3 m/s,
- 2,08 euro/kg

5.1 Výpočet využití hořčíku:

Úbytek obsahu síry odsířením:

$$\Delta S = \%S_{před} - \%S_{po} \quad (4)$$

Obsah Mg v náplni plněného profilu:

$$G_{Mg_{PP}}(kg) = L_{PP} * m_{Mg} \quad (5)$$

Celkové množství vsazeného Mg:

$$Mg_{VS} = \frac{G_{Mg_{PP}}(kg)}{G_{TAV}(kg)} * 100 = \% \quad (6)$$

Využití hořčíku: [8] [9] [10] [11]

plněného profilu Ø 9 mm

$$\text{Vzorek č. 1: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0491}{0,1597} * 100 = 30,74\%$$

$$\text{Vzorek č. 2: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0572}{0,1597} * 100 = 35,81\%$$

$$\text{Vzorek č. 3: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0503}{0,1597} * 100 = 31,49\%$$

plněného profilu Ø 13 mm

$$\text{Vzorek č. 4: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0367}{0,235} * 100 = 15,62\%$$

$$\text{Vzorek č. 5: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0396}{0,235} * 100 = 16,85\%$$

$$\text{Vzorek č. 6: } \eta_{Mg} = \frac{\%Mg_{ZBYT}}{\%Mg_{Vs}} * 100 = \frac{0,0390}{0,235} * 100 = 16,60\%$$

Účinnost modifikace: [8] [9] [10] [11]

Vzorek č. 1 (plněný profil ø 9 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{600 * (0,007 * 0,76 + 0,0491)}{36 * 25 * 0,110} * 100 = 32,98\%$$

Vzorek č. 2 (plněný profil ø 9 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{600 * (0,006 * 0,76 + 0,0572)}{36 * 25 * 0,110} * 100 = 37,43\%$$

Vzorek č. 3 (plněný profil ø 9 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{600 * (0,0047 * 0,76 + 0,0503)}{36 * 25 * 0,110} * 100 = 32,65\%$$

Vzorek č. 4 (plněný profil ø 13 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{605 * (0,0037 * 0,76 + 0,0367)}{20 * 30 * 0,240} * 100 = 16,60\%$$

Vzorek č. 5 (plněný profil ø 13 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{605 * (0,0041 * 0,76 + 0,0396)}{20 * 30 * 0,240} * 100 = 17,95\%$$

Vzorek č. 6 (plněný profil ø 13 mm)

$$\eta_{mod} = \frac{m * (\Delta S * 0,76 + Mg_{ZBYT})}{L_{pp} * Mg_{pp} * G_{pp}} * 100 = \frac{605 * (0,007 * 0,76 + 0,0491)}{20 * 30 * 0,240} * 100 = 16,48\%$$

Tab. 3 Využití hořčíku po modifikaci (%)

Vzorek č.	η_{mod} (%)	η_{Mg} (%)	Ø PP
1.	32,98	30,74	9 mm
2.	37,43	35,81	9 mm
3.	32,65	31,49	9 mm
4.	16,60	15,62	13 mm
5.	17,95	16,85	13 mm
6.	16,48	16,60	13 mm

V tab. 3 jsou shrnuty výsledky ze vzorků 1 až 6 a zapsány informace o účinnosti modifikace η_{mod} a využití hořčíku η_{Mg} , pro plněné profily Ø 9 a Ø 13 mm.

Tab. 4 Parametry použitých PP.

Plněný profil (Ø)	Použito (m)	Hmotnost PP (kg/m)	Hmotnost (kg)	Cena (€/kg)	Cena (€)
9 mm	36,0	0,240	8,640	2,25	19,267
13 mm	19,5	0,395	7,702	2,08	16,020

V tab. 4 je finančně zhodnocené použití plněného profilu Ø 9 mm použitého v délce 36 m a plněného profilu Ø 13 mm použitého v délce 19,5 m.

6. Závěr

V práci jsou uvedeny výsledky analýz výroby litiny s kuličkovým grafitem (LKG) z hlediska dosažení požadované jakosti a optimálních nákladů na její metalurgické zpracování - modifikaci a očkování. Vyhodnocení modifikace bylo zaměřeno na využití hořčíku v závislosti na typu použitého plněného profilu (PP). Metalurgická kvalita vyrobené LKG se hodnotila podle výsledných mechanických vlastností (R_m , A) a mikrostruktury LKG - tj. tvaru, velikosti a počtu částic grafitu (grafit V, VI /mm²).

V teoretické části bakalářské práce je popsáno rozdělení litin, principy krystalizace a jejich vliv na grafitizaci litin.

V experimentální části práce byly provedeny zkušební tavby ve Slévárně a modelárně Nové Ransko s.r.o. V rámci poloprovozních taveb se porovnávalo použití plněného profilu (PP) Ø9 mm plněného předslitinou FeSiMg25 a PP Ø 13 mm s náplní FeSi+30% Mg-technické čistoty.

Ověřovacími tavbami byla testována účinnost modifikace a využití Mg pro hmotnost 600 kg tekutého kovu ve zpracovací pánvi. Příznivějších parametrů využití hořčíku bylo dosaženo při použití plněného profilu Ø 9 mm. U plněného profilu Ø 13 mm probíhala reakce bouřlivěji a což způsobilo méně efektivní reakci i nižší využití hořčíku při modifikaci.

Na základě vyhodnocení provedených analýz doporučuji provést další experimentální tavby pro ověření různých variant náplní PP. Zejména z hlediska optimalizace rychlosti a délky podávaného PP vzhledem k dalším parametrům tavby - na základě konzultací s dodavatelskou firmou.

7. Literatura

- [1] MURGAŠ, M., POKUSOVÁ, M., *Vnútroformová Modifikácia, výroba liatin ADI*, Trnava, 2011.
- [2] KAŇA, V., XXII. *Celostátní školení tavičů a mistrů oboru elektrooceli a tvárné litiny s kuličkovým grafitem: sborník přednášek*. [Žďár nad Sázavou]: [ŽŽAS], [1973]-. ISBN 978-80-02-02612-9.
- [3] VONDRÁK, V., HAMPL J., a HANUS A., *Metalurgie litin: mimopecní zpracování roztavené litiny (očkování, modifikace)*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005. ISBN 80-248-0777-7.
- [4] GIRŠOVIČ, N., G., *Šedá litina, Kniha I, Krystalisace litiny a vznik její struktury, vlastnosti litiny*, Praha, 1955.
- [5] ROUČKA, J., *Metalurgie litin* [online]. Brno, 2014 [cit. 2020-03-07]. Dostupné z: <http://www.fsiforum.cz/upload/soubory/databaze-predmetu/CME/Metalurgie%20litin.pdf>
- [6] POKUSOVÁ, M., *Grafitické liatiny*, Trnava: STU – Materiálovotechnologická fakulta Trnava, 2005
- [7] *Cored wire process* [Online] <https://www.giessereilexikon.com/en/foundry-lexicon/Encyclopedia/show/cored-wire-process-4694/?cHash=707a6a21fcd7a8e692d2f005bbce87c8>
- [8] HAMPL, J., *Metalurgie slévárenských slitin* [online]. Ostrava, 2013 Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Modin_Animace/Opory/02_Metalurgicke_inzenyrstvi/09_Metalurgie_slevarenskych_slitin/Hampl_Metalurgie_slevarenskych_slitin.pdf
- [9] LÁNA I., RAUR L., *Verifikace modifikačního zpracování tvárné litiny injektáží směsí FeSiMg plněným profilem*,
- [10] HUNA, B., ROJÍČEK, V., PĚLUCHA, B. *Modifikační zpracování litiny s kuličkovým grafitem injektáží směsí FeSiMg plněným profilem*. Slévárenství 11, 12 2018, str. 431
- [11] DOLINŠEK, S., *What to consider when treating nodular casting with cored wire*, Wire d.o.o. SI-2000 Maribor, Slovenija
- [12] BLAHA, M., *Výroba litiny s kuličkovým grafitem a feritickou maticí* [online]. Brno, 2013 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=67002. Bakalářská práce. VÚT Brno, FSI

8. Seznam tabulek

Tab. 1 Přehled litin s kuličkovým grafitem [7]

Tab. 2 Chemické analýzy (%) taveb 1 - 6

Tab. 3 Výsledky modifikací

Tab. 4 Parametry použitých PP.

9. Seznam obrázků

- Obr.1 Rovnovážný diagram Fe-Fe₃C [8]
- Obr.2 Odezňování očkovačů [5]
- Obr.3 Očkování očkovacími tělisky [3]
- Obr.4 Očkování do proudu a do pánve [3]
- Obr.5 Základní reakce při modifikaci Mg [2]
- Obr.6 Závislost rychlosti rozpouštění pro různou granulometrii [1]
- Obr.7 Závislost rychlosti rozpouštění granulátu na teplotě tekutého kovu [1]
- Obr.8 Metoda Sandwich [2]
- Obr.9 Metoda Tundish [2]
- Obr.10 Zavádění plněného profilu [7]
- Obr.11 Zařízení pro podávání plněného profilu (autor)
- Obr.12 Předehřívání modifikační pánve (autor)
- Obr.13 Modifikace litiny plněným profilem (autor)
- Obr.14 Nadělené vzorky (autor)
- Obr.15 Obsah plněného profilu Ø 13 mm zvětšený 12x (po vyplavení podílu pod 0,5mm)
- Obr.16 Vzorek č.1 – 111 kuliček/mm², tvaru grafitu V- 26/mm²
- Obr.17 Struktura vzorek č.1, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL
- Obr.18 vzorek č.2 – 107 kuliček/mm², tvaru V-28/mm²
- Obr.19 Struktura vzorek č.2, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL
- Obr.20 Vzorek č.3 – 152 kuliček/mm², tvaru V – 24/mm²
- Obr.21 Struktura vzorek č.3, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL
- Obr.22 Vzorek č. 4 – 89 kuliček/mm², tvaru V – 28mm²
- Obr.23 Struktura vzorek č.4, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL
- Obr.24 Vzorek č. 5 – 84 kuliček/mm², tvaru V – 30/mm²
- Obr.25 Struktura vzorek č.5, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL
- Obr.26 Vzorek č. 6 – 95 kuliček/mm², tvaru V – 25/mm²
- Obr.27 Struktura vzorek č.6, zvětšeno 100x, leptadlo NITAL